



7º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

**Gestión del monte: servicios
ambientales y bioeconomía**

26 - 30 junio 2017 | Plasencia
Cáceres, Extremadura

7CFE01-397

Edita: Sociedad Española de Ciencias Forestales
Plasencia. Cáceres, Extremadura. 26-30 junio 2017
ISBN 978-84-941695-2-6

© Sociedad Española de Ciencias Forestales

Diseño e implementación de un VANT (Vehículo Aéreo No-Tripulado, Unmanned Aerial Vehicle, UAV) multisensor para estudios post-incendio en entornos forestales

REDONDO, I.¹, FERNÁNDEZ-MANSO, A.², QUINTANO, C.^{1,3}, CALVO, L.⁴

¹ Departamento de Tecnología Electrónica, Escuela de Ingenierías Industriales, Universidad de Valladolid

² Departamento de Cie, Escuela Técnica y Superior de Ingenierías Agrarias, Universidad de León

³ Instituto Universitario de Gestión Forestal Sostenible, Universidad de Valladolid-INIA

⁴ Departamento de Ecología, Universidad de León

Resumen

Los Vehículo Aéreo No-Tripulados (VANTs, Unmanned Aerial Vehicles, UAVs) son una ayuda en la prevención, detección, y extinción de incendios forestales. Estamos convencidos de su utilidad también en el posterior análisis de daños ocasionados por el fuego, a pesar de que no hemos localizado ningún estudio científico que lo demuestre. Por este motivo, en este trabajo se diseña e implemente un VANT especializado en esta tarea (recoger información para análisis de daños post-incendio) y en general, un VANT orientado al obtención de imágenes de alta resolución espacial utilizadas en estudios forestales. El primer paso, fue el análisis de las características que dicho VANT debe tener. A continuación, se diseñó e implementó un VANT con bahía extraíble para portar múltiples sensores. Se buscó que el diseño fuera modular, que se adaptara a las diferentes cargas de pago, para aportar flexibilidad y que pudiera despegar/aterrizar en entornos forestales. Tras el diseño y construcción del VANT se realizaron diferentes pruebas de vuelo, todas con resultados satisfactorios. Por este motivo, concluimos que el VANT construido que cumple todos los criterios para trabajar en entornos forestales (especialmente en entornos post-incendio) es una herramienta de gran valor para monitorizar los efectos del fuego en la cubierta forestal.

Palabras clave

Dron, incendio forestal

1. Introducción

Un vehículo aéreo no tripulado (VANT), UAV (Unmanned Aerial Vehicle) o dron es una aeronave que vuela sin tripulación. Los VANT se usan tanto en el ámbito civil como militar y pueden tener diferentes formas, tamaños, configuraciones y características. Se pueden controlar de forma remota pero también tienen la capacidad de desarrollar una misión de forma autónoma, es decir, son capaces de despegar, volar y aterrizar sin la intervención humana. Los misiles crucero se diferencian de los VANT en que estos últimos sí que son recuperable (AUSTIN, 2010; BARRIENTOS et al., 2009).

La utilización de VANT tiene una serie de ventajas y desventajas respecto de los vehículos aéreos tripulados. AUSTIN (2010) incluye como ventajas: la posibilidad de uso en zonas de alto riesgo o difícil acceso, y la no existencia de piloto, por lo que no hay ningún riesgo para su vida y hace que el dron sea capaz de realizar movimientos con aceleraciones que un piloto no podría soportar. Entre las desventajas se enumeran las siguientes: retraso entre la emisión de instrucciones y su recepción, para su proceso y ejecución, posibilidad de ser hackeados o neutralizados, puesto que son muy vulnerables cuando se corta su canal de comunicación con el operador.

Los VANT se pueden utilizar en muchos tipos de aplicaciones como, por ejemplo: misiones en ambientes tóxicos o radiológicos, cartografía, inspección de edificios e instalaciones, transporte, gestión de cultivos y vigilancia de bosques y fronteras, entre otros (ESTEBAN et al., 2015). Aunque no se ha localizado ningún estudio científico que incluya un dron como herramienta para el posterior análisis de daños ocasionados por el fuego, creemos que en este ámbito los drones serían de gran utilidad, pues proporcionarían imágenes post-fuego de alta resolución espacial a partir de las cuales se podría estimar el área quemada y el nivel de afectación.

2. Objetivos

El objetivo del presente trabajo es el diseño y la implementación de un VANT para labores agroforestales especializado en la tarea de recoger información para análisis de daños post-incendio, y de forma más general, de un VANT orientado a la obtención de imágenes de alta resolución espacial utilizadas en estudios forestales utilizando dispositivos de uso comercial.

3. Metodología

Las etapas seguidas en el trabajo fueron:

1. Especificación de los requerimientos que debe cumplir el VANT
2. Análisis de los distintos tipos comerciales de VANT y elección del más adecuado para la tarea indicada
3. Análisis y posterior selección, de los sensores y carga de pago que debe llevar el VANT.
4. Selección de cada componente del VANT: motor, fuselaje, ESC, previo análisis de las diferentes posibilidades
5. Realización de pruebas de vuelo, sistema de piloto automático y estación de tierra.
6. Análisis de posibles mejoras

4. Resultados

4.1 Requerimientos del VANT agroforestal

En una primera etapa se analizaron los requerimientos que debería satisfacer el VANT para aplicaciones agroforestales. Para ello se tuvo en cuenta la poca bibliografía existente al respecto (e.g. Yuan et al., 2015). Estos requerimientos pueden resumirse en:

- Sistema multiplataforma: el VANT debería ser capaz de transportar distintos tipos de sensores de uso agroforestal (Visible, Multi-espectral, Hiperespectral, Térmico, LiDAR) de manera que no sea necesario disponer de un VANT para cada sensor, ya sea intercambiando uno por otro o mediante la coexistencia de dos o más sensores en vuelo.
- Cobertura de vuelo: los bosques son superficies extensas, por lo que el VANT debería ser capaz de cubrir al menos 800ha/vuelo (Solape lineal del 90% y lateral del 70% a 120 metros de altura).
- Sistemas de seguridad: el terreno agroforestal tiene una alta variabilidad en el relieve, lo que dificulta el vuelo del VANT e incrementa la posibilidad de colisión o caída. Por este motivo es aconsejable la inclusión de sistemas para detectar obstáculos y/o cambios en el relieve y vegetación. Además, el VANT va a trabajar en zonas a veces prácticamente inaccesibles, por lo que es necesario intentar implementar un sistema que permita recuperar el VANT y mitigar sus daños en caso de caída.
- Carga de pago (Payload): debido al peso tan alto de los sistemas LiDAR (más de 1kg) el VANT debe tener una carga de pago bastante alta, así como espacio suficiente para albergar todos estos sistemas.

- Presupuesto: el VANT debe tener unos costes asumibles. Los sensores que por su precio no puedan ser comprados se sustituirán por elementos del mismo tamaño y peso que los originales para hacer las pruebas de vuelo.

Además de estas condiciones específicas para la aplicación agroforestal, es necesario conocer y considerar las limitaciones legales en España para poder volar un VANT. Por otra parte, para poder volar un VANT de forma no recreativa se debe de tener la habilitación de AESA de operador de drones, para lo cual hace falta realizar un curso teórico-práctico, superar un examen y disponer de un certificado médico adecuado. Así mismo, el daño ocasionado por el VANT es responsabilidad del operador.

4.2 Tipos de VANT comerciales

Se analizaron los distintos tipos comerciales de VANT para poder seleccionar el más adecuado. De todas las posibilidades, solo 4 grupos suelen emplearse como VANT: helicópteros, aeroplanos, dirigibles y quad-rotors. La tabla 1 muestra las principales características de cada uno de estos grupos, y será la base para la elección del VANT más adecuado para aplicaciones agroforestales.

Tabla 1: Características VANT

Características	Helicópteros	Aeroplanos	Dirigibles	Quad-rotors
Capacidad de vuelo estacionario	***		****	***
Velocidad de desplazamiento	***	****	*	**
Maniobrabilidad	***	*	*	****
Autonomía de vuelo (tiempo)	**	***	****	*
Resistencia a perturbaciones externas (viento)	**	****	*	**
Auto-estabilidad	*	***	****	**
Capacidad de vuelos verticales	****	*	**	****
Capacidades de carga	***	****	*	**
Capacidad de vuelo en interiores	**	*	***	****
Techo de vuelo	**	****	***	*

Las aplicaciones agroforestales requieren un VANT con una gran autonomía de vuelo por lo tanto los Quad-copter y los Helicópteros no son una buena elección puesto que consumen demasiada batería para su sustentación (ESTEBAN et al., 2015). Después de sopesar las diferentes ventajas y desventajas del dirigible y el aeroplano, se eligió el aeroplano debido a su mayor velocidad, resistencia a las perturbaciones externas y a su capacidad de carga.

4.3 Carga de pago

La carga de pago es la cantidad de peso que puede llevar el VANT sin contar el peso del fuselaje ni de los motores o servos. Por lo tanto, englobará el peso de las diferentes baterías, piloto automático y sensores. A mayor carga de pago, menor autonomía, y aunque esa carga de pago sea de combustible, cuanto más se cargue menos kilómetros se podrán hacer por litro de combustible. Para elegir qué peso se destinará a las baterías en el VANT que se va a implementar, primero es necesario saber cuánto necesitan el resto de componentes.

La principal carga de pago del VANT serán los sensores para captar el terreno: cámara en el visible, multiespectral, hiperespectral, y LIDAR.

Respecto a la cámara en el visible, se comercializan multitud de cámaras para realizar mapeos, pero las marcas más utilizadas son Sony y Canon. A la hora de elegir una cámara hay varios factores que hay que tener en cuenta:

- Dimensiones: Las dimensiones de la cámara no pueden ser excesivas, en nuestro caso las dimensiones límite serán: 130x80x75. Con estas dimensiones hay muchas cámaras profesionales ‘compactas’.
- Peso: Debido a que el VANT diseñado va a ser capaz de llevar una gran carga, 1.3kg como mínimo reservado para el sensor, no hay problemas con el peso en las cámaras compactas, pero se establece un límite de 550g para conseguir una mejor autonomía.
- Megapíxeles: Una baja resolución va a limitar la calidad del mapeamiento de forma exponencial.
- Disparo: El disparo debe ser programable y automático, cuantos más fotogramas por segundo sea capaz de hacer, más rápido podrá ir el VANT y mayor solape entre fotos habrá, lo que mejora el mapeamiento.
- Obturación: cuanto más rápida sea la cámara menos posibilidad de imágenes borrosas. Ya que el VANT se desplaza a gran velocidad es un parámetro importante.
- Formato: Si bien está presente en todas las cámaras buscadas, el formato RAW permite mantener toda la información de la imagen.

Los precios de estas cámaras varían de 300 a 3000 euros, no se va a elegir una cámara como tal porque su elección depende del presupuesto o de la calidad que se necesite, pero la tabla 2 muestra distintas opciones que cumplirían las especificaciones en cuanto a peso y dimensiones. Respecto a la autonomía, las cuatro elegidas tienen una autonomía similar a 220 fotos/110 minutos.

Tabla 2: Comparación de distintas cámaras

Cámara	Dimensiones (mm)	Peso (con batería y SD) (gr)	Resolución (MP)	Precio (€)
Canon G7 X	103,0 x 60,4 x 40,4	304	20,9	378
Canon G9 X	98,0 x 57,9 x 30,8	209	20,9	450
Sony DSC-QX100	62,5 x 62,5 x 55,5	179	20,2	449
Sony DSC-RX1RM2	113,3 x 65,4 x 72 *	507	43,6	3500

Datos extraídos de las páginas Web oficiales de las empresas. *En este caso, la dimensión de 113.3 mm hace referencia al eje vertical, estando la cámara en su posición de funcionamiento mirando hacia el terreno. Esta dimensión es superior a los 80mm fijados, pero como el diámetro de la lente es inferior a los 80mm, parte de ésta puede colocarse en el agujero de la panza del VANT.

Respecto a los sensores multispectrales, los más utilizados son los sensores de la marca Parrot: Parrot Sequoia y Parrot Red Edge. Se elige Parrot Sequoia para este trabajo, aunque puede usarse cualquiera de los dos. El sensor multispectral Sequoia está compuesto de dos partes que se conectan mediante un cable:

- Un sensor solar que se coloca en la parte superior del VANT y permite captar la radiación solar para realizar correcciones en las imágenes solares, el GPS y un sistema IMU. Tiene unas dimensiones de 47 x 39,6 x 18,5 mm.
- Sensor multispectral que toma imágenes del terreno y que también tiene una unidad IMU. Tiene unas dimensiones de 59 x 41 x 29,5 mm.

Las imágenes se guardan en la tarjeta SD. El sistema tiene un peso total de 107gr

Existen multitud de compañías que trabajan desarrollando sensores hiperespectrales. En este caso se ha elegido dos de ellas puesto que desarrollan sensores hiperespectrales para VANT: “Cubert” y “Bayspec”. Debido a que Cubert no especifica las dimensiones ni el peso, se ha optado por Bayspec, en concreto “OCI TM-U-2000”. Tiene unas dimensiones de 80 x 60 x 60 mm, con una lente de 35mm y un peso de 190g. Con el miniordenador incorporado tiene un peso de 350g. Su consumo es de menos de 2W y permite capturar hasta 120 cubos por segundo.

Respecto a las cámaras termográficas, Se ha elegido la compañía FLIR porque fabrica cámaras térmicas para VANT. Disponen de tres tipos de cámaras FLIR VUE, FLIR VUE PRO y TAU 2 con unas resoluciones de 640, 336 y 324. Finalmente, se elige la cámara térmica FLIR VUE PRO por sus especificaciones.

- Permite descargar los datos y cargar la cámara mediante un puerto mini-USB. Este mini-USB permite conectar la cámara a un teléfono Android o IOS, para descargar las imágenes directamente sin necesidad de un ordenador, o utilizarlo como salida de video, lo cual permite enviar el video mediante un transmisor (con un OSD, por ejemplo) a la estación base.
- Todos los datos se guardan en una tarjeta SD extraíble.
- Compatibilidad con Micro Air Vehicule Link (MAVLINK).
- Permite el control mediante Pulse Width Modulation (PWM) de las paletas de colores, iniciar y detener la grabación y muchas más funciones.
- Bluetooth incorporado para poder configurarlo en pleno trabajo.
- Dimensiones: 45 x 45 x 65 mm, por lo que entra en la bahía perfectamente.
- Peso: 115gr.

Por último, El LIDAR está compuesto por:

- ALS: Escáner Láser Aerotransportado. Es el emisor de haces laser.
- GPS diferencial. Lo cual permite posicionar los puntos en sus coordenadas. Si se añade un sistema RTK mediante receptores GPS en la estación de control la precisión en el posicionamiento que se puede alcanzar puede ser menor a 10 cm.
- INS: Sistema Inercial de Navegación. Informa de los giros y de la trayectoria del avión.

Se necesita un sistema LIDAR con un peso y unas dimensiones razonables. La mayor parte de sistemas LIDAR pesan muchísimo y tienen grandes dimensiones, es por eso que se elige la marca Velodyne LiDAR puesto que fabrica sensores para VANT de dimensiones muy reducidas. Se elige el LiDAR HDL-32E, (diámetro 144,2 mm, longitud 85,3 mm, peso con cables y GPS; 1300 gr, distancia 100 +/- 0,02 m).

La tabla 3 muestran los sensores elegidos con la intención de identificar cuál es el más limitante en cuanto a dimensiones y volumen. Como vemos, el más limitante en cuanto a peso y dimensiones es el LIDAR. La potencia que consumen es muy baja o en algunos casos nula al llevar una batería incorporada.

Tabla 3: Comparación de los diferentes sensores

Sensor	Peso (gr)	Dimensiones (mm)	Consumo (W)	Otras necesidades
Visual	507	65,4 x 72 x 113,3	-	-
Multiespectral	107	59 x 41 x 29,5	5W + 1	Necesita una apertura en la parte superior del fuselaje.
Hiperespectral	190	60 x 60 x 80	2	160 gr + si se añade mini-ordenador
Térmico	115	45 x 45 x 65	-	Sistema FPV 120 gr
LiDAR	1300	144.2 x 85.3 x 85.3	12	-

De este modo, se reservan 1300gr para los sensores de captación de terreno. El piloto automático con sensores de seguridad pesa menos de 300 gr por lo que se destinarán 400 gr a las baterías de la electrónica. Respecto a la batería del motor principal se destinarán 2000gr puesto que necesitará mucha potencia.

4.4 Componentes del VANT

La carga de pago es muy grande y pocos fuselajes en el mercado tendrán esa capacidad. Además, los sensores y baterías ocupan espacio por lo que necesitaremos un fuselaje con mucho espacio interior. Así mismo, hay que analizar y seleccionar varias características de nuestro modelo: como son la configuración de las alas, tipo de cola, selección de materiales, y uso de Flaps.

Puesto que nuestro avión va a volar a bajas velocidades y sin giros, se necesita un avión estable, que simplificará su control y lo hará más seguro, por lo que se elige una configuración de ala alta. Respecto al tipo de cola, optaremos por una configuración tipo H que permite reducir el área de cada uno de los estabilizadores verticales, mejora el control a bajas velocidades y aporta redundancia al sistema puesto que si un servo se rompe aún podría funcionar con el otro, o alguna configuración estándar a diferente altura que las alas. Finalmente, se elige una configuración con un sólo motor, situado tras el fuselaje, porque permite poner en la punta sistemas FPV y sensores.

Respecto al material utilizado para su construcción se elige un fuselaje de EPO, utilizando una de estas mezclas:

- Fuselaje de fibra / alas de EPO / fibra de carbono para puntos exigentes
- Fuselaje y alas de EPO y recubierto de fibra con refuerzos de fibra de carbono.

Estas dos opciones suelen ser las más utilizadas, la primera aporta rigidez y durabilidad al cuerpo con una pared pequeña y unas alas que en caso de impacto pueden repararse de forma sencilla. Mientras que la segunda opción da rigidez global a todo el VANT y el EPO permite absorber la energía en caso de golpes.

Se hizo una búsqueda sobre los diferentes fuselaje disponibles en el mercado, debido a la alta carga de pago y a la alta autonomía es necesario un modelo que sea capaz de cargar mucho peso y tenga un gran volumen interior. El modelo finalmente elegido fue Finwing Airtitan pues recoge todas las necesidades técnicas. Este modelo dispone de cola en H, con una abertura para visores y sensores en la panza. Envergadura: 2.5m. Material EPO. Peso máximo: 7kg con una carga de pago para baterías y sensores de 4 kg. De esta forma podríamos disponer de 2 kg en baterías y 2 kg para nuestra carga de pago específica lo cual da una autonomía muy buena. El interior es muy espacioso y puede albergar un sistema LIDAR sin ningún problema, salvo una modificación a la estructura. Se puede lanzar a mano, en pista (despegue muy corto) o por lanzadera y el aterrizaje debe ser con el tren de aterrizaje, aunque el terreno puede ser bastante abrupto a la hora de aterrizar.

Se elige el motor M60K, diseñado específicamente para el Airtitan, y que tiene una buena calidad/precio. Es un motor con 540KV lo que significa que por cada voltio dará 540 rpm. La potencia máxima del motor es de 1500w. Tiene un empuje estático de 6kg alimentado con 6s y una hélice de 15". Nuestra hélice además será bipala y de 6-7" de paso. Respecto al ESC (Electronic Speed Control) o variador de velocidad hemos seleccionado un ESC de 85A OPTO, eso significa que se elige uno que no tenga incorporado un BEC (Battery Eliminator Circuit). De esta manera se elegirá un UBEC (puesto que es una fuente de alimentación conmutada por IGBTs) para alimentar a parte de la electrónica del avión.

Para poder comunicarse con el VANT se necesitan varios enlaces de radio. Por un lado, se tiene que utilizar un sistema que envíe y reciba telemetría desde el VANT hasta la estación base. El sistema de telemetría irá conectado al piloto automático. Este será el enlace de seguridad que debe de mantenerse siempre, por ello, se utilizan frecuencias muy bajas puesto que no hace falta mucha calidad. Su rango de frecuencias suele ir desde 433MHz hasta 1.3Ghz. Cuanta más baja es la frecuencia más distancia se puede recorrer con la misma potencia y más capacidad de bordear obstáculos tiene la señal, es por eso que las más utilizadas son 433Mhz y 915Mhz, pero como 900Mhz se usa mucho en el ámbito de las comunicaciones y está saturado en España, se ha elegido 433Mhz. Cabe destacar que el uso de la mayor parte de frecuencias desde los 885 MHz hasta los 1.2 Ghz están delimitados a servicios concretos y es ilegal utilizarlas (comunicación con Galileo, telefonía...). Así mismo, se establece una potencia máxima dentro de las frecuencias a utilizar siendo

100mW para 2.4Ghz, 25mW para 5.8 GHz, utilizada para sistemas FPV, y para 433MHz la normativa dicta que dependiendo del uso va desde los 10mW hasta los 100mW.

Por otro lado, se necesita un sistema de radiocontrol con el que poder operar teniendo el VANT a la vista y poder dirigirlo en caso de algún tipo de anomalía. La frecuencia más utilizada es de 2.4GHz, esto es debido a que con esta frecuencia no hay prácticamente interferencias con otros VANT que también utilicen 2.4Ghz y estén volando cerca. El sistema de radiocontrol necesitará una emisora, un módulo transmisor y un receptor.

La emisora se utiliza para manejar el VANT propiamente dicho, hay emisoras de 4-10 canales. En este caso se ha elegido una emisora Turnigy 9XR PRO. Es una emisora muy utilizada en el mundo del RC porque se puede configurar prácticamente todo. Se utiliza una batería Lipo 3s para darle la energía a la emisora y al módulo transmisor, que se coloca en la parte posterior. Permite recibir telemetría por ejemplo del estado de la batería que alimenta el receptor de radio y soporta distintos tipos de VANT. Como no utiliza módulo propio y su firmware es Open Source puede utilizar diferentes módulos de transmisión con frecuencias diferentes.

El módulo transmisor que se ha elegido es el FrSKY DJT. Este módulo utiliza la tecnología ACCST (Advanced Continuous Channel Shifting Technology) que va cambiando entre 80 canales cientos de veces por segundo para asegurar que no hay interferencias. En terreno llano es capaz de alcanzar distancias de 1.5km. Se alimenta de la batería LIPO de la emisora y tiene un consumo de 50mA y una potencia exterior de 60mW. También tiene la tecnología ACCST y 2 antenas para mejorar la recepción de la señal. Una de las características importantes en cuanto a seguridad es el Failsafe que en caso de pérdida de la señal o de falta de alimentación al receptor coloca los servos del VANT en una posición determinada. Esto permite mitigar, mediante una buena elección de esas posiciones, las consecuencias de una pérdida momentánea de la señal consiguiendo que el VANT tome una posición de descenso neutra, lo cual reduciría los daños en caso de caída.

En los aviones se busca un compromiso entre el par y el peso del motor, y como no se suele necesitar mucho par, los servos suelen pesar hasta 9g. En nuestro caso y debido a lo grande que es el VANT buscaremos distintos servos con distinto par dependiendo su función:

- 3 servos de 6kg/cm para los alerones y el servo encargado de dirigir el tren de aterrizaje. (32gr)
- 1 servo 2.5kg/cm para el elevador (17gr)
- 2 servo 2.2kg/cm para el timón de dirección. (17gr)

Una vez elegidos la mayor parte de los componentes del hardware, es necesario elegir el controlador de vuelo, piloto automático. Existen muchos modelos de controladores de vuelo, en nuestro caso se elige la plataforma PIXHAWK, que permite un gran rendimiento con muchas funciones configurables y muchos módulos de expansión para añadir sensores. La placa tiene varios sistemas duplicados para aumentar la seguridad como un segundo procesador. Así mismo se puede dar potencia a la placa de tres formas diferentes: mediante USB, mediante la entrada de potencia o utilizando los pines de entrada de los servos. Esto permite añadir redundancia y asegurar de que Pixhawk siempre va a disponer de energía suficiente.

El GPS elegido es el U-Blox LEA 6, que se conecta directamente a la controladora de vuelo y su consumo ronda los 120 mW en modo continuo. Tiene una batería que es capaz de funcionar de Backup en caso de algún fallo en la alimentación principal.

Por otro lado, se ha elegido el sistema de telemetría desarrollado por Pixhawk que funciona a 433Mhz ya que las opiniones de las personas que lo han comprado son positivas. Consta de dos receptores- transmisores. Uno de ellos irá conectado a la placa controladora mientras que el otro irá

conectado en el ordenador. Para la conexión se utiliza el protocolo MAVLINK. Tiene una potencia máxima de 100mW, pero puede ajustarse dependiendo de los requerimientos, disminuyendo la potencia consumida.

Respecto a los sensores de seguridad, muchos de ellos ya están presentes en el piloto automático elegido como los sensores de intensidad, voltaje, sensores inerciales de respaldo. Pero hay dos que hay que añadir casi de manera obligatoria ya que mejoran la seguridad drásticamente: el tubo de pitot y el LIDAR Rangefinder.

El tubo de pitot, se utiliza para calcular la presión de remanso (suma de la presión estática y de la presión dinámica) y permite, entre otras cosas, calcular la velocidad del aire o de un gas mediante la ecuación de Bernoulli. La necesidad de este sensor hay que verla desde un punto de vista aerodinámico. La sustentación se crea por la velocidad relativa del aire al entrar en el perfil alar, que no es la misma que la velocidad del VANT. Por lo tanto, hace falta algún sensor para calcular esa velocidad relativa y así asegurar la sustentación del avión. De esta manera se consigue que el avión no entre en pérdida por una velocidad relativa demasiado baja o un ángulo de ataque demasiado grande. El tubo de pitot se conectará al piloto automático, ya que el mismo ya tiene implementado un código para poder realizar las correcciones oportunas y utilizar la información para aumentar sus funciones. Permite hacer un cálculo aproximado de la autonomía y calcular de forma experimental la velocidad de pérdida con la cual puede mejorar el control del VANT reduciendo el ángulo de ataque o aumentando la velocidad cuando la velocidad relativa no sea suficiente. Así mismo los aterrizajes mejoran muchísimo.

También se utilizará el LIDAR longitudinal o Rangefinder (se denomina así porque se usa para medir distancias) como sensor de seguridad. El LIDAR Rangefinder se colocará en posición horizontal y permitirá saber la distancia real al terreno, de manera que se puede definir una distancia de seguridad para evitar accidentes. No se necesita un LIDAR que sea capaz de medir grandes distancias, se busca uno que pueda medir 40-100 metros, que sea económico, que no pese mucho y que no consuma demasiada potencia. Se elige la compañía Lightware por su buena relación calidad/precio. En concreto el SF11/C, que permite medir distancias de 120m con una precisión de 10cm. Toma 16 mediciones por segundo, lo cual es suficiente a la hora de seguir el terreno y sus conexiones son compatibles con PIXHAWK.

Finalmente, se determinarán las baterías que se incluirán en el VANT. Las baterías más utilizadas por su buena relación capacidad/peso son las Lipo. Se necesita una batería 22.2V y puesto que la potencia máxima es de 1500W, se precisa una batería que sea capaz de ofrecer 68A como mínimo al descargarse. Como se quiere mucha autonomía, la batería para alimentar al motor será de gran capacidad y pesada, aunque no pueden superar los 2 kilos, por lo que habrá que buscar baterías de gran capacidad, pero con un coeficiente de descarga lo más bajo posible para minimizar el peso. De esta forma la batería elegida es la Turnigy Multistar 6S 16000mAh. Ésta batería nos aporta 16A-h y tiene un coeficiente de descarga de 10C, que es un valor bastante bajo y con el cual se consigue 160A en continuo. Pesa 1920gr, es menos de los 2 kilos reservados para la batería y sus dimensiones entran en el compartimento del VANT. Funcionando el motor con su potencia máxima, es decir, consumiendo 68A la batería duraría $(16/68) \times 60 = 14.2$ minutos. Pero estos consumos de intensidad solo se producen en el despegue, con un vuelo sin grandes subidas y bajadas el consumo de intensidad suele bajarse hasta 4 o 5 veces menos del valor máximo, es decir, entre 17 A y 13.5 A lo cual nos permitiría volar alrededor de 60 minutos cargados al máximo.

Por otro lado, se necesita una batería para alimentar la electrónica de a bordo, es decir, el piloto automático, el receptor, los servos... El piloto automático puede alimentarse por la parte de los servos y por su entrada de potencia por lo que la forma más segura de proceder es optar por el uso de 2 baterías diferentes. Se utiliza un BEC de 5V y 5A para alimentar los servos y en caso de emergencia la placa. La batería es capaz de dar 25W, 12W irán destinados al sensor en la situación

más desfavorable y 13W irán destinados a los servos que es una potencia más que suficiente puesto que no suelen superar 1 Amperio. Así mismo, se necesitará una batería para alimentar la emisora, se elige una Lipo expresamente fabricada para ella.

Respecto a la estación base que controlará el VANT, habrá un ordenador con el Mission Planner, el sistema de telemetría, la emisora con su módulo... Es decir, sistemas electrónicos muy delicados y costosos que hay que proteger. En los entornos agrícolas y forestales los tres principales problemas pueden ser: caídas durante el transporte, polvo y agua. Por ello necesitamos guardar todos estos sistemas en una maleta que sea capaz de proteger los componentes.

El ordenador de la estación base llevará el Mission Planner, que es un software desarrollado por Ardupilot y que tiene numerosas funciones: planear las misiones mediante waypoints, configurar y calibrar los sensores de la controladora, cargar el último firmware de Pixhawk o controlar el VANT en el aire. La comunicación con el VANT se lleva a cabo mediante el receptor-transmisor de 433Mhz que se conecta al ordenador.

4.5 Pruebas de vuelo

Para las pruebas de vuelo con los diferentes sensores se usarán objetos de dimensiones y peso similar. No hace falta probar los cinco sensores, solo con probar el LiDAR, el sensor visual y el multiespectral será suficiente para analizar cómo influyen las dimensiones y el peso de cada uno de los sensores. A la hora de realizar las pruebas de vuelo se deberán hacer cuatro vuelos de alrededor de 10 minutos cada uno. Las pruebas serán:

- Primer vuelo: Vuelo con el sensor multiespectral de 10 minutos con el modo de vuelo Autotune para determinar los parámetros del PID para ese nivel de carga.
- Segundo vuelo: Una vez determinados los parámetros del PID hay que calibrar el tubo de pitot. Para eso se realiza un vuelo automático del VANT en círculos durante 10 minutos.
- Tercer vuelo: Vuelo con el sensor visual, 500 gr, de 10 minutos con el modo de vuelo Autotune para determinar los parámetros del PID para ese nivel de carga.
- Cuarto vuelo: Vuelo con el sensor LiDAR, 1300 gr, de 10 minutos con el modo de vuelo Autotune para determinar los parámetros del PID para el nivel de carga máximo.

Para los dos primeros vuelos se necesitará un piloto experto que maneje el VANT con soltura para evitar riesgos de rotura. Una vez realizados los vuelos de prueba ya se tienen todos los valores de configuración del controlador para cada nivel de carga, y al haber calibrado el tubo de pitot los aterrizajes serán mucho más precisos. Por último, se realizarán dos vuelos de prueba de autonomía, uno con la carga mínima y otro con la carga máxima en modo automático y a altura constante. Todos los vuelos se han realizado en el Club de vuelo "Los Alcotanes" en Valladolid.

Registro del campo de vuelo:

- Fecha: 31/05/2016 Duración: 4 horas. Se centran los servos, se hacen pruebas de alcance del enlace de telemetría y de 2.4Ghz, se programa el ESC, se pone en marcha el motor realizando un pequeño recorrido por la pista, se sujetan los componentes en sus lugares respectivos para cumplir el CDG (Figura 1b)
- Fecha: 7/06/2016. Duración: 4 horas. Se realizan las últimas modificaciones, como acortar el recorrido de los servos con la emisora. Se comprueba que todo funciona correctamente. Se vuela en modo manual durante 10 minutos (Figura 1c) El avión aterriza sin incidencias. El avión tiende a trepar demasiado al dar acelerador, para solucionarlo se inclinará el motor unos grados y se colocará la batería principal un centímetro más para adelante. Se acorta el recorrido de los servos para cortar control.
- Fecha: 31/6/2016. Duración: 4h. Se realiza un vuelo con los nuevos cambios y el centro de gravedad ligeramente desplazado hacia el morro. El vuelo dura 10 minutos hasta que el

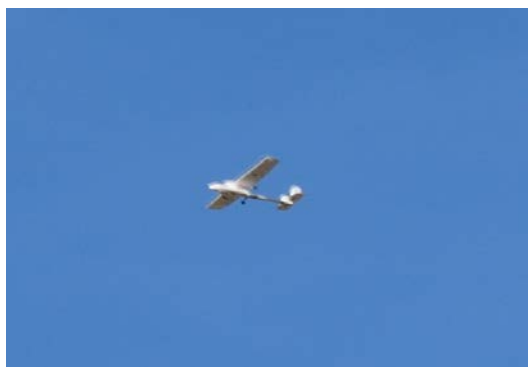
piloto experto detecta posibles vibraciones en el motor y decide aterrizar. Justo cuando toma tierra, el motor sale disparado cizallando parte del fuselaje. La causa de la salida del motor de su bancada junto con la montura se debe a unas vibraciones en el motor no tenidas en cuenta durante el diseño del fuselaje. Se diseña una superficie de montaje del motor con 3D, se añaden injertos en el fuselaje para repartir mejor las cargas del par del motor y se pega todo con abundante epoxi y Cianoacrilato (Figura 1d).



a) Prototipo montado



b) Ajustes primer día de vuelo



c) Vuelo realizado el segundo día de prueba



d) Fuselaje reparado

Figura1. Pruebas de vuelo

4.6 Posibles mejoras

Se analiza el fuselaje, el piloto automático, la seguridad, la funcionalidad y facilidad de uso del VANT y la estación base. A continuación, aparece una lista de posibles problemas a mejorar:

- El fuselaje permite albergar en su interior los sensores, baterías y piloto automático, pero cada vez que se quiere cambiar de sensor se debe dedicar mucho tiempo en recolocar los componentes para mantener el CDG. Lo mismo pasa cuando se quiere cargar las baterías. Esto reduce notablemente su facilidad de uso y flexibilidad.
- El GPS se puede mejorar para conseguir mayor precisión. El sistema que mejor precisión da es el GPS RTK, menos de 10cm de error.
- El fuselaje actual no permite la utilización de un paracaídas. La utilización de un paracaídas junto con el uso de Pixhawk reduciría las posibilidades de daño en una caída. Esto se hace muy importante cuando el sensor que se lleva es el LiDAR, puesto que sus costes pueden llegar a los 30000€.

- Baliza de posicionamiento: Para operaciones por encima de los 120m, y pensando en una futura certificación de la aeronave, es necesario tener una baliza para que el resto de vehículos aéreos, y la torre de control, puedan detectar el VANT.
- Para mayor autonomía se debería añadir a la estación de control una batería de coche, lo cual permitiría cargar las baterías del VANT y dar energía a todos los componentes de la estación base.
- El radio de actuación está limitado por la normativa y por el radio de alcance del enlace de telemetría. Pero si se certificase la aeronave, se podría, previa notificación a AESA, realizar misiones de varios kilómetros. Por lo tanto, habría que mejorar el radio de actuación de la estación base, sobretodo el enlace de telemetría.
- Aunque el material EPO del que está hecho la aeronave permite la absorción de impactos, se degrada mucho su superficie con el uso, por lo que su durabilidad debería mejorarse si se buscase la comercialización del VANT.
- El VANT gracias al LiDAR Rangefinder junto con Pixhawk es capaz de seguir el relieve y de realizar despegues y aterrizajes muy precisos, pero no es capaz de detectar obstáculos muy abruptos como paredes verticales o arboles singularmente más altos que el resto. Esto puede conducir a un choque frontal.
- La estación no dispone de enlace de video, lo cual no permite el envío de imágenes en tiempo real. Esto se hace muy necesario si se quisiera realizar labores de detección de incendios agroforestales.

5. Conclusiones

Se ha diseñado y construido un VANT mediante integración de componentes que cumple las necesidades mínimas especificadas para aplicaciones agroforestales, específicamente análisis de daños post-incendio. Se han realizado pruebas de vuelo donde se ha conseguido un despegue y una realización de la misión de manera autónoma, aunque el aterrizaje aún se está configurando. Durante el desarrollo han surgido muchos problemas que se han ido resolviendo, y se ha conseguido aprender suficiente sobre la tecnología de los VANT como para poder recomendar diferentes mejoras. Para maximizar la calidad y prestaciones del producto se ha diseñado un VANT modular, eficiente y que cumple los requisitos exigidos de durabilidad, facilidad de uso, seguridad y capacidades.

6. Agradecimientos

El trabajo se enmarca dentro de los proyectos: GESFIRE (AGL2013-48189-C2-1-R) financiado por el ministerio español de Economía y Competitividad y el Fondo de desarrollo Regional Europeo, y FIRECYL (LE033U14), financiado por el gobierno de la comunidad autonómica de Castilla y León.

7. Bibliografía

AUSTIN, R. 2010. Unmanned Aircraft Systems. Wiley, Chichester.

BARRIENTOS, A., DEL CERRO, J., GUTIÉRREZ, P., SAN MARTÍN, R., MARTÍNEZ, A., & ROSSI C. 2009. Vehículos aéreos no tripulados para uso civil. Tecnología y aplicaciones. *Grupo Robótica y Cibernética, Universidad Politécnica Madrid*, pp. 1–29.

ESTEBAN, J.L. (coord), CUERNO, C., RAMIREZ, J.M., OÑATE, M., EZCURRA, A., DÍAZ, L., SAEZ, D., BELTRÁN, A., LÓPEZ, C., MARTÍN, D., & RAMOS, H. 2015. Los Drones y sus aplicaciones a la ingeniería civil. Ed. Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid. Madrid, pp. 242.

YUAN, C., ZHANG, Y., & LIU, Z. 2015. A survey on technologies for automatic forest fire

monitoring, detection, and fighting using unmanned aerial vehicles and remote sensing techniques. *Can. J. For. Res.*, 783–792.